

# Estructuras de hormigón armado bajo carga dinámica severa.

## Parte III: Ejemplo de simulación numérica

Publicamos la tercera parte y última de este artículo sobre estructuras de hormigón armado bajo carga dinámica severa en el que, los autores, nos han ido exponiendo diferentes ejemplos. En esta ocasión, se pone patente que con el desarrollo de los ordenadores durante las últimas décadas se ha dado la posibilidad de utilizar el método de los elementos finitos (FEM: Finite Elements Method) para estudiar los efectos de una carga dinámica severa, como en el caso de las explosiones. A continuación se describe el uso del método para este tipo de situaciones de carga.

---

**Alejandro Alañón Juárez.**

Ingeniero Técnico de Obras Públicas  
Máster en Técnicas Experimentales  
Avanzadas en la Ingeniería Civil  
Departamento de Construcción y Agronomía.  
E.P.S. de Ávila - USAL

**Anastasio P. Santos Yanguas.**

Dr. Ingeniero de Minas  
Departamento de Ingeniería de Materiales.  
E.T.S.I. de Minas – UPM

**María Jesús Vázquez Gallo.**

Dra. Ciencias Matemáticas.  
Departamento de Ingeniería Civil: Servicios  
Urbanos. E.U.I.T. de Obras Públicas - UPM

---

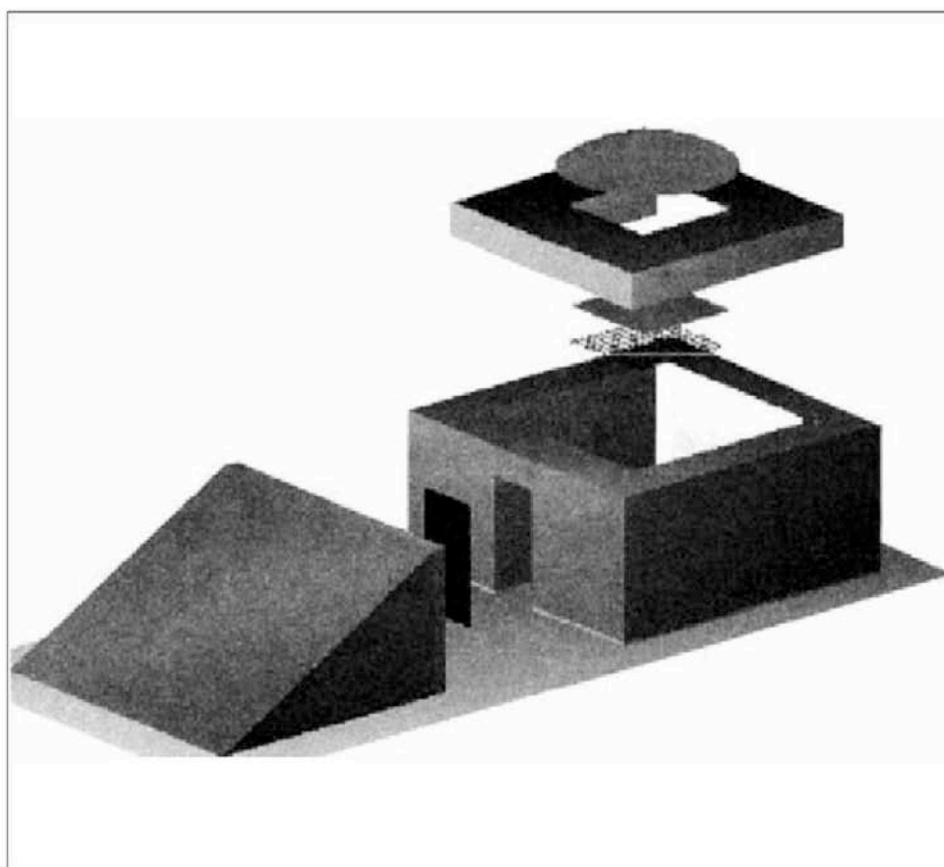


Figura 1. Esquema del polvorín.

**E**n este trabajo se describe una simulación numérica realizada para modelar el efecto de una explosión en una estructura de hormigón armado y contrastar los resultados obtenidos con los códigos empíricos utilizados en la actualidad, fundamentalmente el manual del Ejército de los EE.UU.: *UFC 3-340-02. Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions* (5 December 2008) [14].

En este ejemplo, se ha empleado el programa comercial LS-DYNA® [10], desarrollado por Livermore Software Technology Corporation.

LS-DYNA® [10] es un código de elementos finitos de propósito general para el análisis de grandes deformaciones estáticas y de la respuesta dinámica de las estructuras, incluidas las estructuras junto a los líquidos.

## ASPECTOS GENERALES DE LA ESTRUCTURA

En este trabajo la estructura que sirve de base para la simulación numérica consiste en un polvorín de superficie configurada en forma de agrupación de un número par de células, mínimo cuatro y máximo de dieciséis, rea-

lizada íntegramente en hormigón armado.

Cada célula tiene unas dimensiones interiores en planta de 4,0 m x 4,0 m y una altura de 2,5 m y dispone de acceso desde el exterior a través de un hueco de 1,0 m x 2,0 m provisto de puerta no resistente a explosiones, ver Figura 1.

## MODELO NUMÉRICO

### Características del modelo numérico

Dada la simetría de la configuración del diseño geométrico del polvorín, y del dimensionado de las armaduras, se ha realizado un modelo "3x2" que cubre todas las posibilidades de explosión, a saber, explosión en una celda de esquina o en una celda interior, tal y como se muestra en las Figuras 2 a 4.

El modelo realizado está compuesto por:

- 371.125 nodos
- 141.056 elementos sólidos
- 188.674 elementos barra

Dada la simetría de la configuración del diseño geométrico del polvorín, y del dimensionado de las armaduras, se ha realizado un modelo "3x2" que cubre todas las posibilidades de explosión

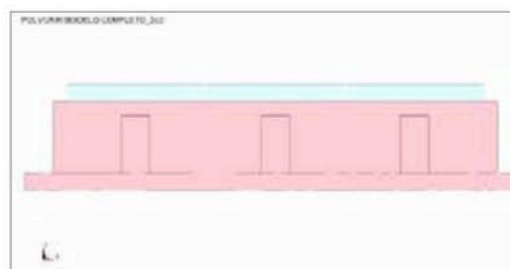


Figura 2. Polvorín – Aizado

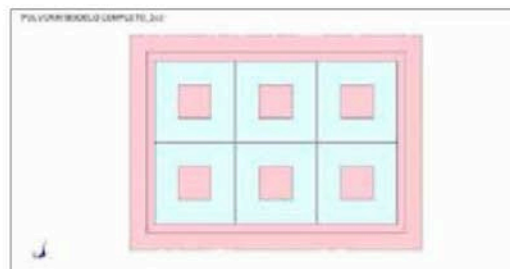


Figura 3. Polvorín – Planta

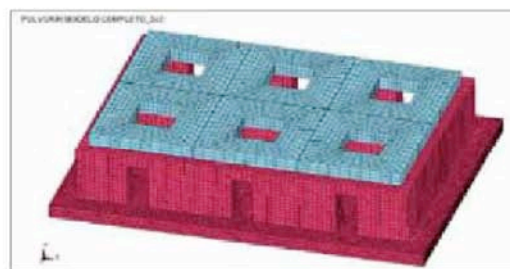


Figura 4. Polvorín – Perspectiva (mallado)

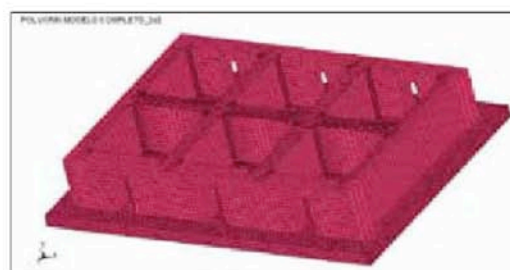


Figura 5. Hormigón de la losa inferior y de los muros del polvorín

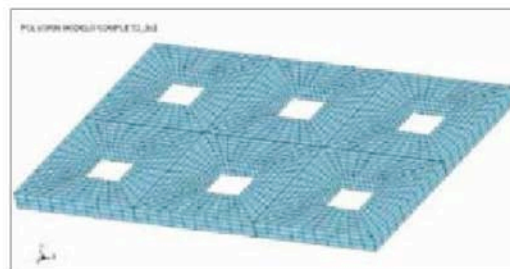


Figura 6. Hormigón de las tapas de las células



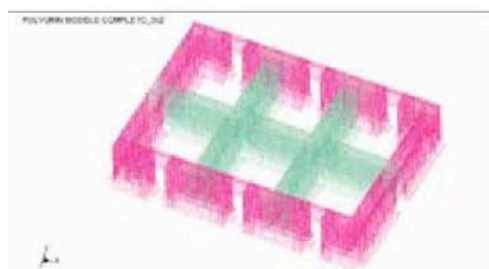


Figura 7. Armaduras Ø25 mm de muros interiores y muros perimetrales

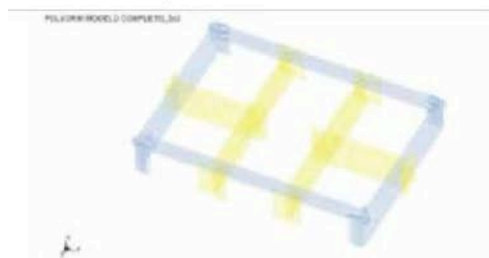


Figura 8. Armaduras Ø32 mm de muros interiores y muros perimetrales

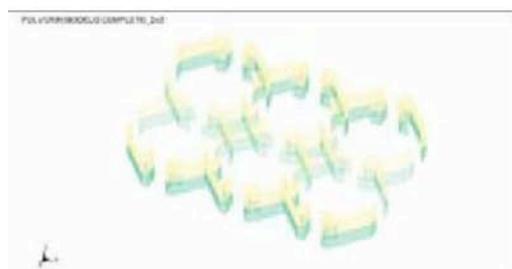


Figura 9. Armaduras inclinadas horizontales Ø25 y Ø32 mm



Figura 10. Armaduras inclinadas verticales Ø32 mm

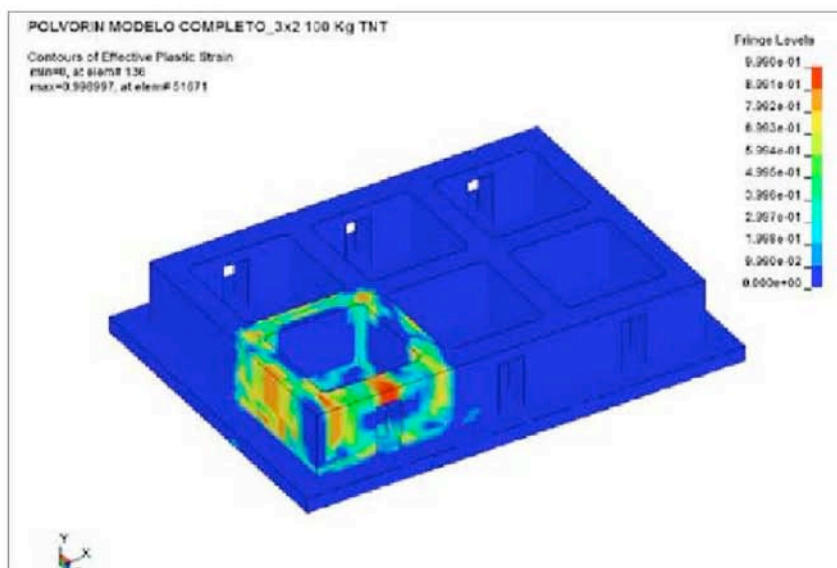


Figura 11. Nivel de daño en el hormigón para una detonación de 100 kg de TNT en una célula de esquina. Vista anterior

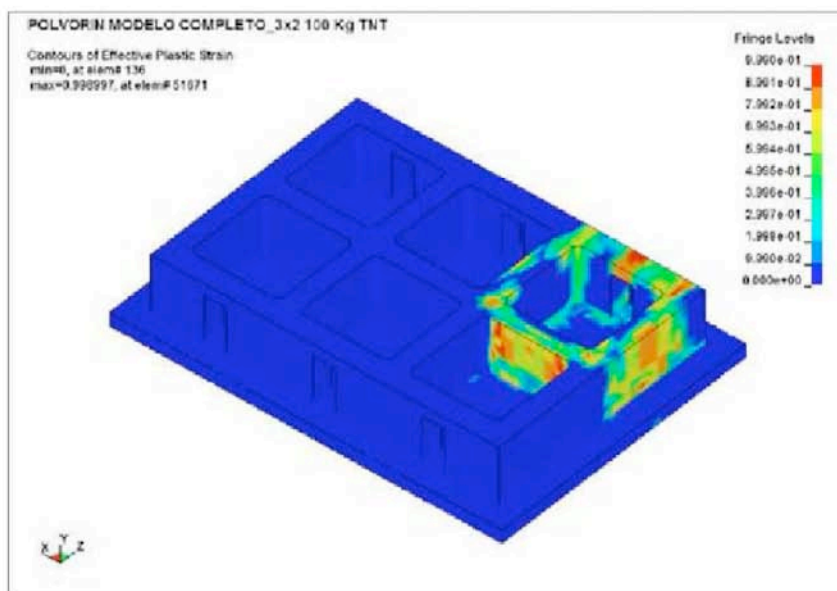


Figura 12. Nivel de daño en el hormigón para una detonación de 100 kg de TNT en una célula de esquina. Vista posterior

Para cada uno de los puntos de explosión posibles se ha realizado simulación numérica con: 100 kg, 200 kg, 400 kg y 1.000 kg de TNT

Y para cada uno de los dos puntos de explosión posibles, se ha realizado la simulación numérica con: 100 kg, 200 kg, 400 kg y 1.000 kg de TNT, por lo que son ocho simulaciones en total.

A efectos de un manejo más fácil de los distintos elementos y armaduras que componen el polvorín, se han dividido en doce partes diferenciadas, que posteriormente el

post-procesador permite ver de forma particular, o el conjunto que el usuario desee. Dichas partes son las detalladas a continuación, que se muestran en las figuras 5 a 10:

1. Material sólido 1. Hormigón de la losa inferior y de los muros del polvorín.
2. Material sólido 2. Hormigón de las tapas de las células
3. Barras tipo 1. Armadura interior Ø25 mm.
4. Barras tipo 2. Armadura interior Ø32 mm.
5. Barras tipo 3. Armadura frontal Ø8 mm.
6. Barras tipo 4. Armadura perimetral Ø25 mm.
7. Barras tipo 5. Armadura perimetral Ø32 mm.
8. Barras tipo 6. Armadura inclinada horizontal Ø25 mm.
9. Barras tipo 7. Armadura inclinada horizontal Ø32 mm.
10. Barras tipo 8. Armadura inclinada vertical Ø32 mm.
11. Barras tipo 9. Armadura de la losa inferior Ø25 mm.
12. Barras tipo 10. Armadura de la losa inferior Ø32 mm.

## RESULTADOS OBTENIDOS

En el presente apartado se detallan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones descritas en el apartado anterior, bien mediante gráficas, bien mediante tablas.

Tal y como se muestra en las Figuras 11 a 14, el nivel de daño en el hormigón para la detonación de 100

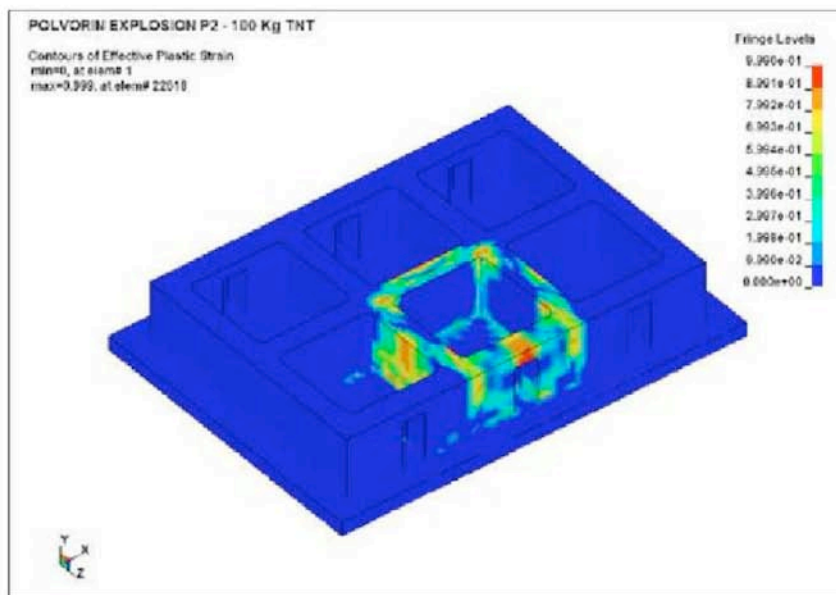


Figura 13. Nivel de daño en el hormigón para una detonación de 100 kg de TNT en una célula interior. Vista anterior

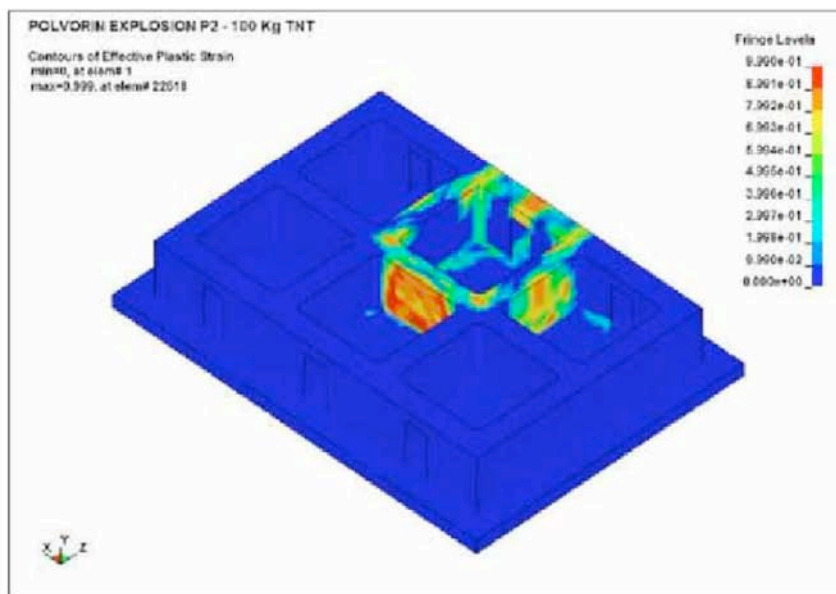


Figura 14. Nivel de daño en el hormigón para una detonación de 100 kg de TNT en una célula interior. Vista posterior

El nivel de daño en el hormigón para la detonación de 100 kg de TNT en las células de esquina e interior es pequeño



Cuando se aumenta la cantidad de explosivo a detonar hasta 200 kg de TNT, el nivel de daño aumenta notablemente en las dos situaciones estudiadas

kg de TNT en las células de esquina e interior es pequeño, observándose zonas pequeñas en color rojo, que se localizan fundamentalmente en los nudos, aunque en el modelo correspondiente a la celda interior también se observan daños en la cara posterior del muro interior.

Cuando se aumenta la cantidad de explosivo a detonar hasta 200 kg de TNT, el nivel de daño aumenta notablemente en las dos situaciones estudiadas; las zonas en color rojo no se limitan a pequeñas áreas en los nudos, sino que ya se corresponden con amplias zonas en los muros situados en el contorno de la detonación. Los daños se localizan fundamentalmente en las caras posteriores (trasdós) de los muros, que están solicitadas a tracción, y por tanto serán las áreas de hormigón más fisuradas, como se aprecia en las figuras, de la 15 a la 18.

En el siguiente paso, para una detonación de 400 kg de TNT, se observa un nivel de daño en el

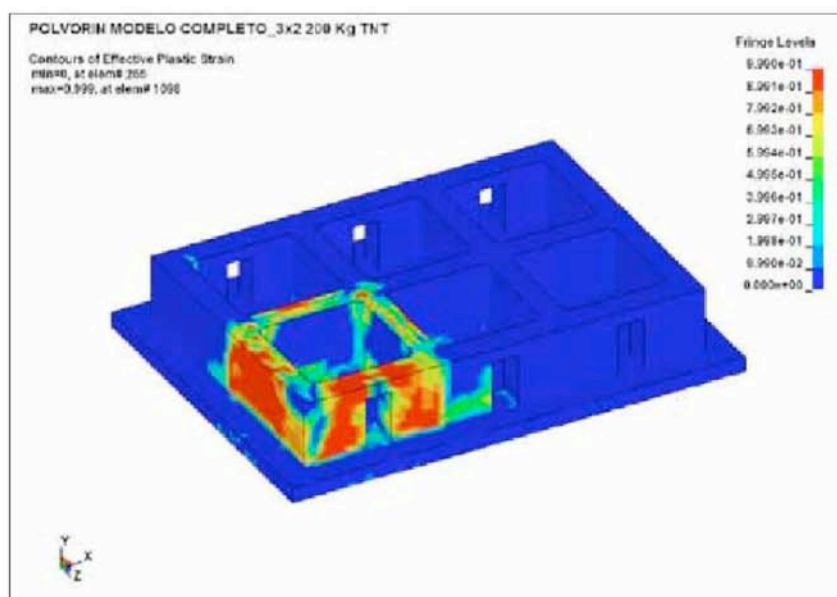


Figura 15. Nivel de daño en el hormigón para una detonación de 200 kg de TNT en una célula de esquina. Vista anterior

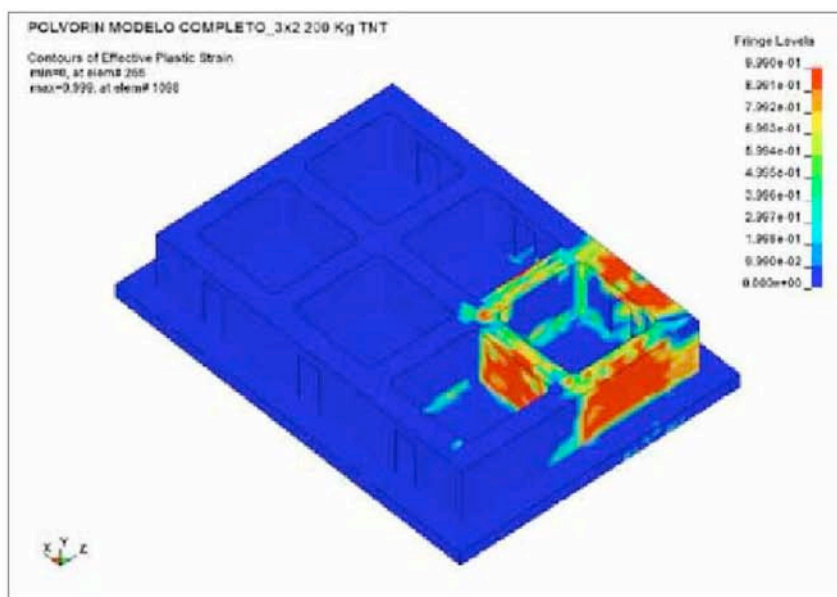


Figura 16. Nivel de daño en el hormigón para una detonación de 200 kg de TNT en una célula de esquina. Vista posterior

hormigón de los muros perimetrales al punto de detonación que es similar al producido para 200 kg de TNT, si bien, la diferencia es que comienzan a observarse incipientes zonas de daño en muros alejados del punto de detonación. Un aspecto reseñable es que aún no se observan proyecciones de elementos de hormigón correspondientes a los muros de las cé-

lulas, teniendo en cuenta que ya se está estudiando una detonación con una carga importante muy de TNT.

Por último, cuando la detonación se produce con 1.000 kg de TNT, se observan daños generalizados en los muros perimetrales al punto de explosión, y también en los muros más próximos a los

Figura 17. Nivel de daño en el hormigón para una detonación de 200 kg de TNT en una célula interior. Vista anterior

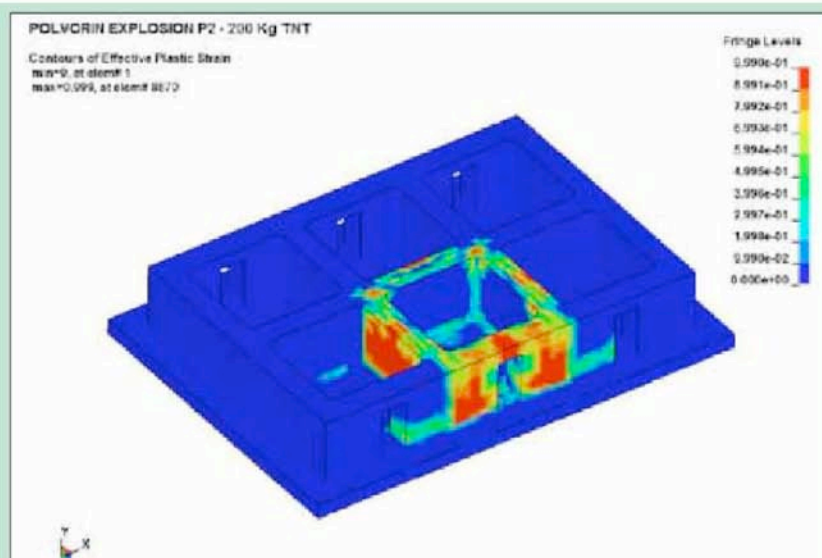


Figura 18. Nivel de daño en el hormigón para una detonación de 200 kg de TNT en una célula interior. Vista posterior

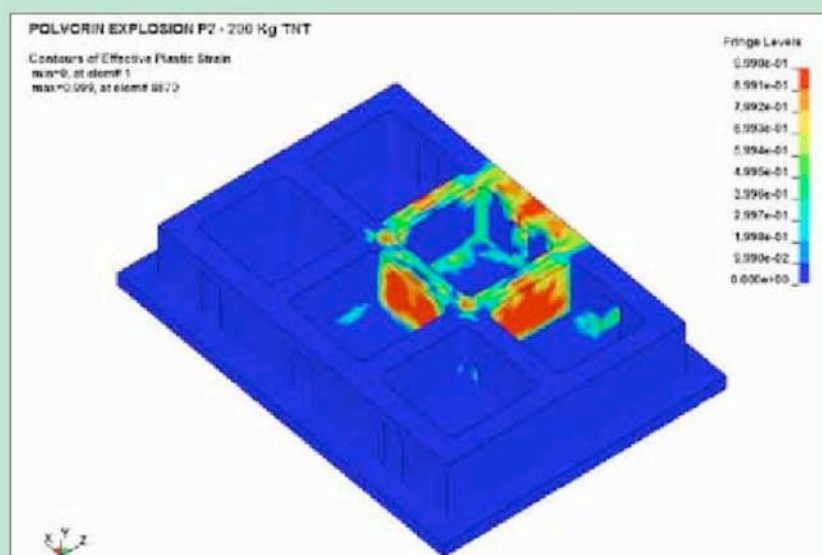


Figura 19. Nivel de daño en el hormigón para una detonación de 400 kg de TNT en una célula de esquina. Vista anterior

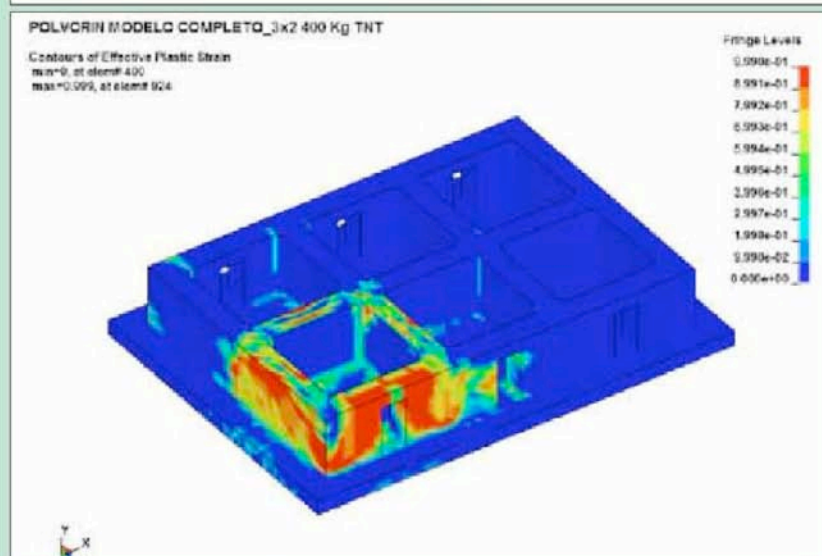


Figura 20. Nivel de daño en el hormigón para una detonación de 400 kg de TNT en una célula de esquina. Vista posterior

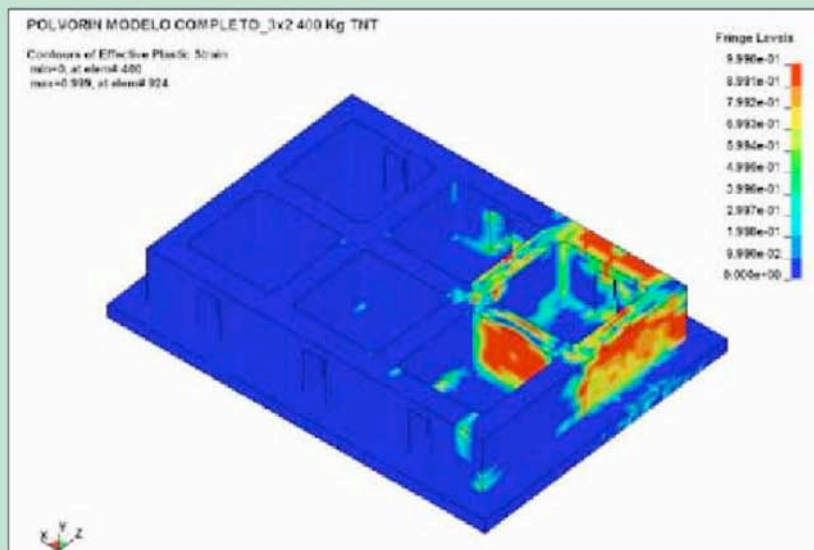


Figura 21. Nivel de daño en el hormigón para una detonación de 400 kg de TNT en una célula interior. Vista anterior

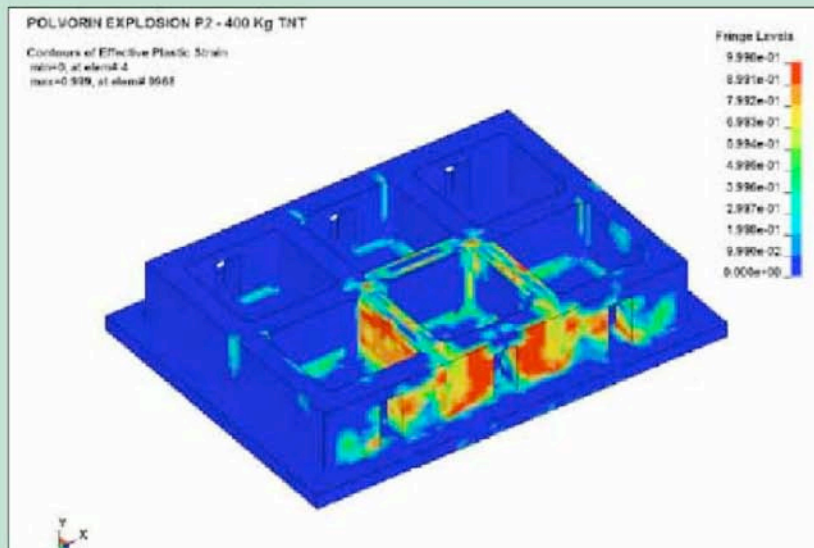
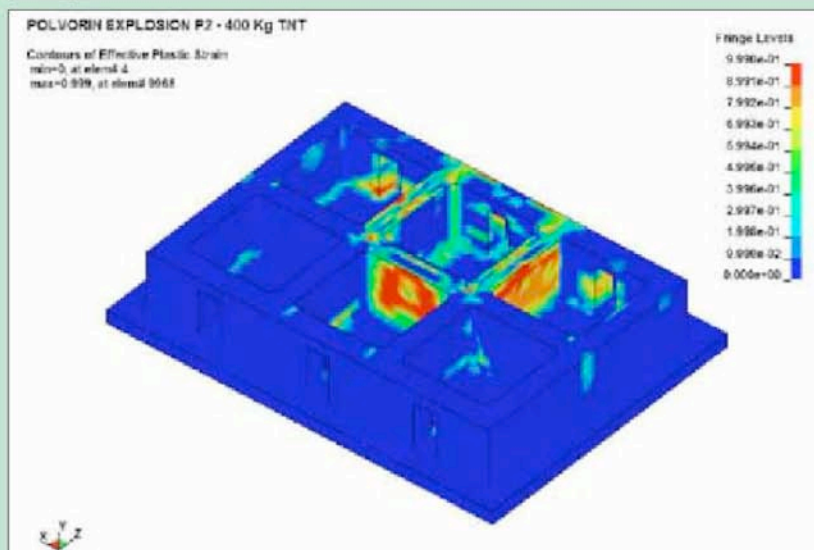


Figura 22. Nivel de daño en el hormigón para una detonación de 400 kg de TNT en una célula interior. Vista posterior





Cuando la detonación se produce con 1.000 kg de TNT se observan daños generalizados en los muros perimetrales y próximos al punto de explosión

anteriores. Los daños se extienden por la estructura del polvorín debido a la intensidad de las solicitaciones producidas, transmitiéndose fuerzas axiales de entidad a través de los muros hasta los elementos extremos: ver Figuras 23 a 26. Este efecto se puede observar de forma muy clara en las figuras correspondientes a la explosión en la celda interior; en la vista anterior (Figura 25) se observa una zona de daño en el muro testero originado por el empuje del muro interior longitudinal, mientras que en la vista posterior (Figura 26) se advierten áreas dañadas en el muro longitudinal posterior, debido a los empujes de los dos muros transversales interiores. Es en este modelo cuando comienzan a observarse proyecciones de elementos de hormigón correspondientes a los muros de las células.

Por último, para un mejor alcance de los resultados obtenidos en las distintas familias de armaduras dispuestas en la estructura, se incluye una tabla (Tabla 1) con

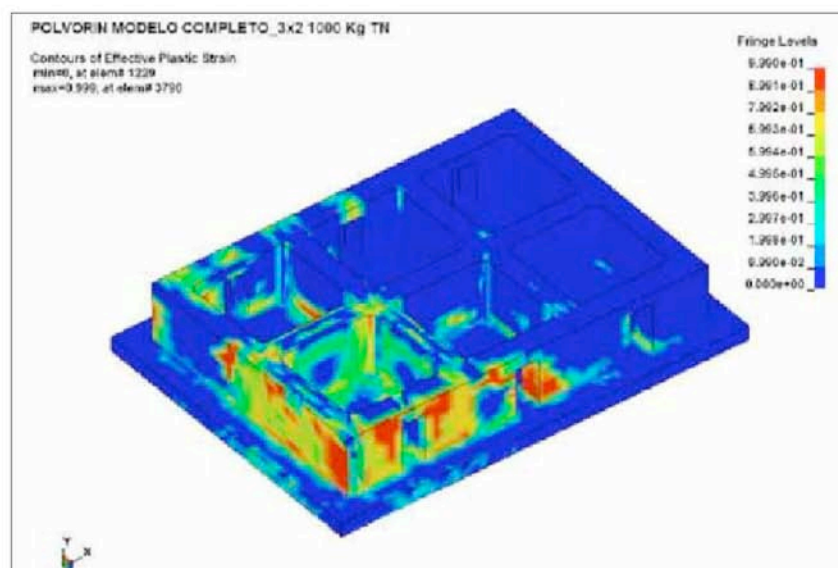


Figura 23. Nivel de daño en el hormigón para una detonación de 1.000 kg de TNT en una célula de esquina. Vista anterior

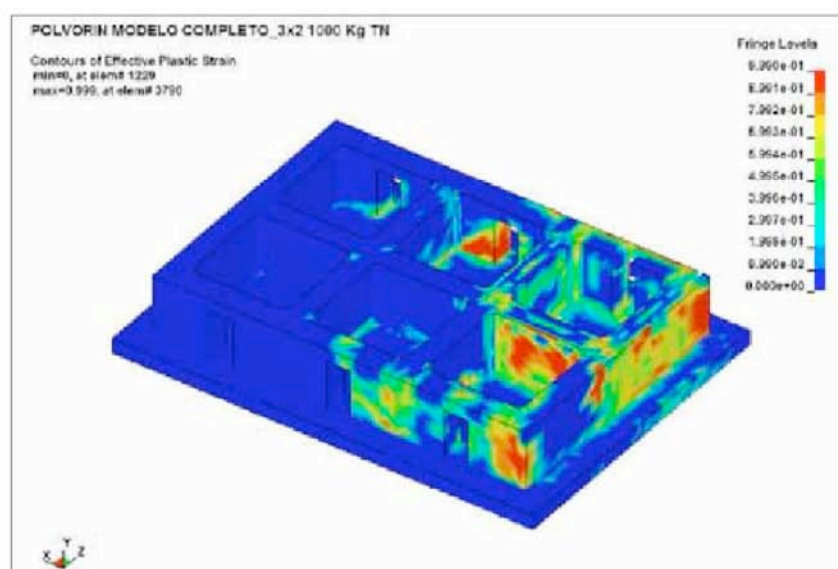


Figura 24. Nivel de daño en el hormigón para una detonación de 1.000 kg de TNT en una célula de esquina. Vista posterior

los valores numéricos aproximados de las tensiones de trabajo.

## CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en el modelo numérico se pueden deducir los siguientes comentarios y conclusiones:

- El modelo construido con el método de los elementos fini-

tos basado en integración explícita, realizado empleando el programa LS-DYNA® [10], ha reflejado de forma satisfactoria el comportamiento del prototipo a escala real ensayado con 100 kg de TNT.

- En las distintas simulaciones realizadas se observa que la armadura trabaja a tensiones axiales muy por debajo del límite de rotura, y únicamente para el



Figura 25. Nivel de daño en el hormigón para una detonación de 1.000 kg de TNT en una célula interior. Vista anterior

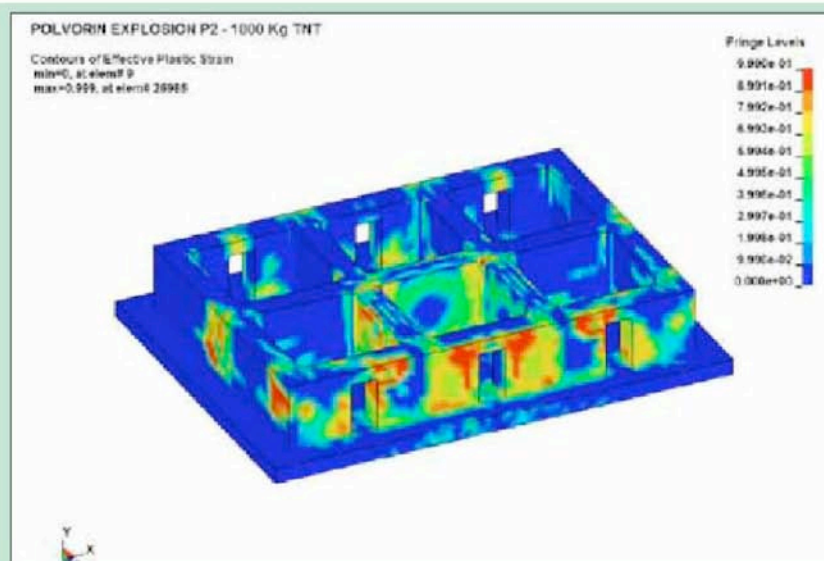
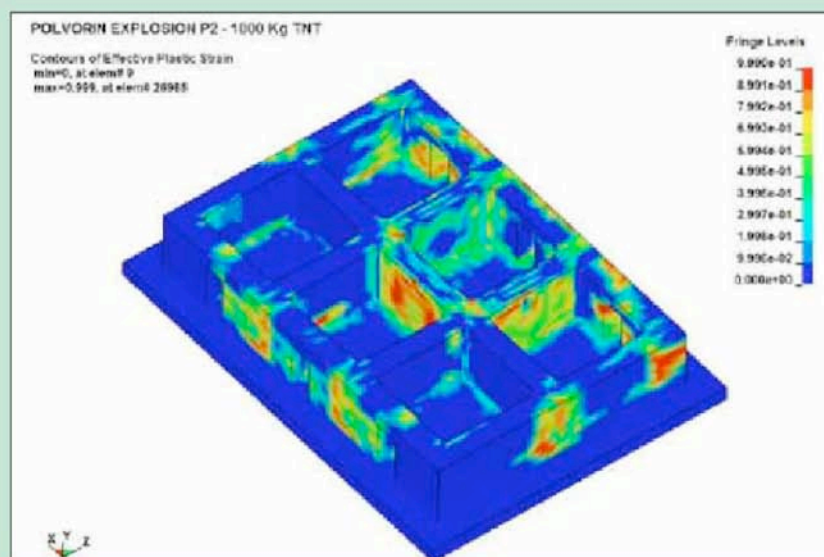


Figura 26. Nivel de daño en el hormigón para una detonación de 1.000 kg de TNT en una célula interior. Vista posterior



Tensiones axiales de trabajo de las armaduras (MPa)	100 kg de TNT		200 kg de TNT		400 kg de TNT		1.000 kg de TNT	
	P.1	P.2	P.1	P.2	P.1	P.2	P.1	P.2
Armaduras $\varnothing 25$ mm en muros perimetrales e interiores	322	352	400	405	406	411	435	439
Armaduras $\varnothing 32$ mm en muros perimetrales e interiores	147	157	239	269	400	346	406	401
Armaduras $\varnothing 25$ y $\varnothing 32$ mm inclinadas horizontales	343	282	399	398	402	401	410	406
Armaduras $\varnothing 32$ mm inclinadas verticales	206	243	351	383	400	400	406	405

Tabla 1. Tensiones axiales de trabajo de las armaduras (MPa)

En las distintas simulaciones realizadas se observa que la armadura trabaja a tensiones axiales muy por debajo del límite de rotura

modelo de 1.000 kg de TNT se supera de forma clara el límite elástico del acero empleado.

Asimismo, se observa que las armaduras trabajan de forma relativamente uniforme, lo que indica la pequeña necesidad de racionalización de las cuantías dispuestas.

- Los muros de hormigón mantienen su integridad de forma muy satisfactoria, en consonancia con lo expuesto en los dos puntos anteriores: existe correlación entre el modelo numérico y el manual UFC 3-340-02 [14]; y el margen de seguridad real en la estructura es alto.
- De acuerdo con los resultados obtenidos para las distintas cargas explosivas consideradas en el presente artículo, los resultados obtenidos mediante la simulación numérica empleando el programa LS-DYNA® [10], indican que el procedimiento de cálculo propuesto por el manual UFC-340-02 [14] proporciona un margen de seguridad en el entorno de  $2,15 \approx 2,30$ . ■

## BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Baker W. E. (1973): Explosions in air. Univ. of Texas Press, Austin.
- [2]. Bulson P. S. (1997): Explosive loading of engineering structures. E&FN Spon, Londres.
- [3]. CEB-FIB Model Code 1990 (1993): CEB-FIB Model Code 1990, Design Code. Thomas Telford, Lausanne, Suiza.
- [4]. ConWep (1992): Collection of conventional weapons effects calculations based on TM 5-855-1, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, USA.
- [5]. Forsen R. and Nordström M. (1992): Damage to Reinforced Concrete Slabs Due to the Combination of Blast and Fragment Loading. B 20101-2.6, National Defence Research Establishment (FOA), Tumba.
- [6]. Geradin M. and Rixen D. (1999): Mechanical Vibrations, Theory and Application to Structural Dynamics. Wiley, Paris, 411 pp. Gylltoft K. (1983): Fracture mechanics models for fatigue in concrete structures.
- [7]. Hughes G. (1984): Hard missile impact on reinforced concrete. Nuclear Engineering and Design, Vol. 77, 1984, pp. 23-35.
- [8]. Johnson G. R., Beissel S. R., Holmquist T. J. and Frew D. J. (1998): Computed radial stresses in a concrete target penetrated by a steel projectile. Fifth International Conference on Structures Under Shock and Impact V, pp. 793-806.
- [9]. Krauthammer T. (2008): Modern Protective Structures, Design, Analysis and Evaluation. Taylor & Francis Group. Florida.
- [10]. LSTC. LS-DYNA®. Keyword User's Manual Volume I & II. Livermore Software Technology Corporation (LSTC). Livermore. California. Junio 2009.
- [11]. Ross C. A., Jerome D. M., Tedesco J. W. and Hughes M. L. (1996): Moisture and strain rate effects on concrete strength. ACI Materials Journal, Vol. 93, No. 3, May-Jun 1996, pp. 293-300.
- [12]. Rossi P. and Toutlemonde F. (1996): Effect of loading rate on the tensile behaviour of concrete: Description of the physical mechanisms. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, Vol. 29, No. 186, Mars 1996, pp. 116-118.
- [13]. Takeda J., Tachikawa H. and Fujimoto K. (1974): Mechanical behavior of concrete under higher rate loading than in static test. Proc. Mechanical Behaviour of Materials, pp. 479-486.
- [14]. U.S. Army – Department of Defense (2008). UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC 3-340-02). Structure to Resist the Effects of Accidental Explosions. Department of Defense of United States of America.
- [15]. Ziellinski A. J. (1982): Fracture of concrete and mortar under uniaxial impact tensile loading. Doctoral Thesis, Delft University of Technology.
- [16]. Zukas J. A. and Scheffler D. R. (2000): Practical aspects of numerical simulations of dynamic events: effects of meshing. International Journal of Impact Engineering, Vol. 24, No. 9, Oct 2000.